4 シンポジウム　心臓再考

心臓MRI検査の必要性

東京警察病院　放射線科
吉田　学誉

はじめに

MRIの大きなメリットは，低侵襲性であり，さまざまなコントラストが得られることである．心臓MRI（cardiovascular magnetic resonance; CMR）にとって，この両者は大きな役割を果たしており，臨床でも後者のメリットによって多くの診断が可能となってきた．しかし，CMRの普及については伸び悩んでいるといえる現状である．その問題点として，術者の撮像知識や医師の理解度，検査時間の問題など，さまざまな要因がある．

今回の内容は「心臓再考」ということと，“Versus”のほとんどの対象が技師であることから，私的ではあるが，これらの問題点と改善法を加えつつ，CMRの基礎や特徴および論文を中心に説明し，実際の症例を提示したいと思う．

CMRの特徴

まず，CMRのメリットについては先述したが，低侵襲性（もしくは非侵襲的）であることだが，造影剤の使用時には注射針を刺すことや検査時間が長く，精神的な苦痛があり，低侵襲性の観点に疑問が残る．しかし，この疑問を払拭することは可能であると考える．

まず，通常の検査で使用されているMRIの強調画像には，T1WIやT2WI，T2*WI，PDWI，diffusion WIなどがあり，非造影での血管描出の手法としてのsteady state free precession法（SSFP），さらに血行動態や血管形態診断に造影剤を使用することなど，さまざまな画像を得ることが可能である．実際に当院で使用しているCMRにおける強調画像の分類は，T1WIにおいてlate gadolinium enhancement法（LGE法：遅延造影）やvessel wall imaging（VWI），quantitative flow imageの診断に利用している．T2WIに関しては，急性心筋梗塞における心筋浮腫やVWIに対して，T2*はmicrovascular obstruction（MO）の心筋内出血の有無に利用している．また，造影剤を利用した心筋血流評価にはT1WIのperfusion image，balanced-TFE（PhilipsでのSSFP法）におけるcine MRIやwhole heart coronary MRA（WHC-MRA），tagging imageを撮像することが可能である（図1）．

Perfusionは経時的血流変化を描出できるため，造影早期層における心筋内膜下の低信号領域（心筋虚血）を描出することが可能である．T2WI-STIR-black bloodは脂肪抑制を使用したT2WIと同様に炎症の描出が可能で，高信号領域は心筋浮腫を描出している．また，障害や線維化を起こした心筋は，毛細血管の血流がなくなることで細胞外液に浸透した造影剤がwash outされなくなる．そのため，LGEでは心筋梗塞や心筋症などの障害心筋に造影効果が見受けられる．T2*WI-black bloodでは，心筋内に低信号領域の欠損像が見受けられるが，T2*WIは磁化率に敏感であることから，心筋内出血と判断できる．また，B-TFEを用いたcine MRIやWHC-MRAは，心機能の計測や形態診断に用いられることが多い．

CMRの撮像手順

心臓の形態には個人差があり，複雑な形になっているため，撮像断面の再現性が重要となってくる．当院で行っている位置決め方法を図２に示す．最初の位置決め画像（survey）で得られたtransverse画像により，左室の房室弁と心尖部を結ぶlineに沿って撮像し，得られた画像は図２－①のようになる．図２－①に対し左室の短軸になるように左室の中央を撮像すると，図２－②が得られる．図２－①の左房室弁から心尖部を結ぶlineと図２－②の左室中央と右室の鋭縁部を結ぶlineの２方向を設定することで，図２－③の四腔像が得られる．その図２－③の四腔像に対し，左房室弁と心尖部を結ぶlineと図２－②で設定した四腔像撮像断面に垂直になるよう設定すると，図２－④のように，左室長軸像を得ることが可能である．図２－④の左室長軸像に対し，左室房室弁と心尖部を結ぶlineの垂直断面を設定し，かつ図２－③四腔像の左房室弁と心尖部を結ぶlineの垂直断面を設定することで，図２－⑤のような正確な左室短軸像を得ることが可能である．この左室短軸像は，左室長軸像と四腔像に垂直で交わるので，正確な直交３方向断面撮像であり，あらゆる方面から心筋の形態・動きを観察することができる．

実際に撮像している心筋梗塞，心筋症，正常心筋の四腔像を図３に示す．すべての画像において，右房室腔，左房室腔，弁も正確に描出されている．CMRの撮

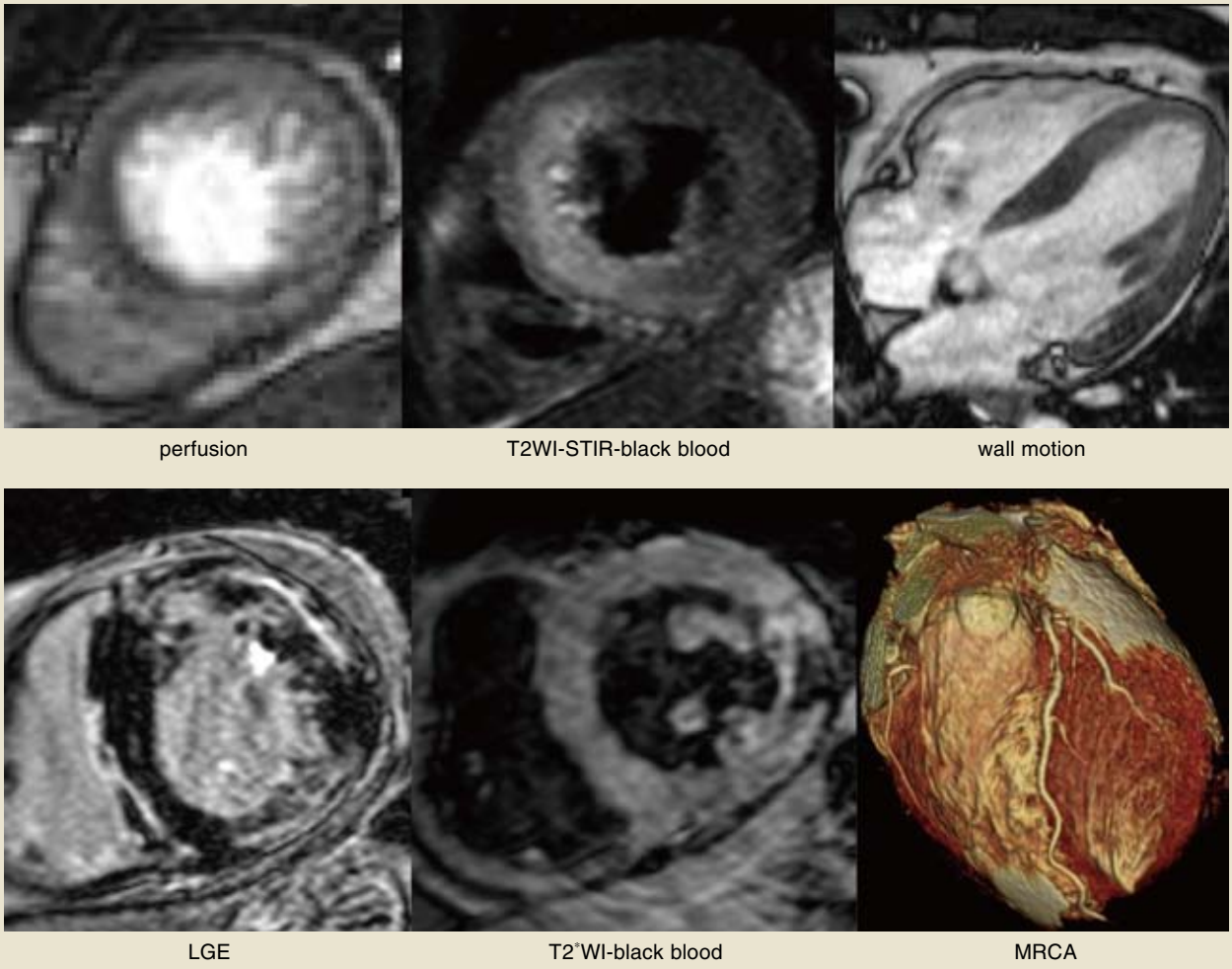

図 1　CMRにおける，さまざまなコントラストの画像

像技術レベルが異なる技師による撮像だが，同断面を得ることが可能である．すなわち，撮像断面の再現精度が高く，術者における差が出にくいということが理解していただけると思う．

CMRの分解能

当院は2008年 4 月に移転し，診断装置も一新したことから，図 4 に示す通り，移転する前まで心筋SPECTの空間分解能は64 × 64であったが，現在は128 × 128の空間分解能で撮像している．MRIにおいてperfusion imageは，5 年前では128 × 96の空間分解能で撮像していたが，現在3.0テスラと1.5テスラMRI装置において，さらに高空間分解能のperfusion imageが可能となっている．同様にLGEの撮像においても，面内やslice厚の高分解能化が進んでおり，slice厚を薄くすることでLGEの問題であるpartial volume effectを減少させることや，より鮮明な内膜下梗塞の描出に貢献している．また，空間分解能だけでなく，parallel imagingなどの高速撮像技術によって，perfusion imageの時間分解能も改善されている．

CMRのデメリット

CMRのデメリットとして最初に挙げられるのは検査時間が長いことで，臨床においては大きな問題となっている．CMRはone stop shopが可能である数少ない検査法であり，perfusion imageの負荷や安静，cine MRI，LGE，WHC-MRAを撮像終了するまで約 1 時間くらい費やす．しかし，必要最小限の撮像内容であれば，30分以内に検査時間の短縮も可能である．この検査時間短縮の裏にはCTの多列化に伴う冠動脈CTの普及が起因している．冠動脈CTは短時間に且つ容易に行うことが可能で，WHC-MRAの撮像件数が減少し，LGE中心のプロトコールを行っている．当院ではAMIに対してT2WI-STIR-black blood，T2*WI-black blood，cine MRI，perfusion-rest，LGEを撮像している．OMIに対してはAMIのroutineからT2*WI-black bloodを省く

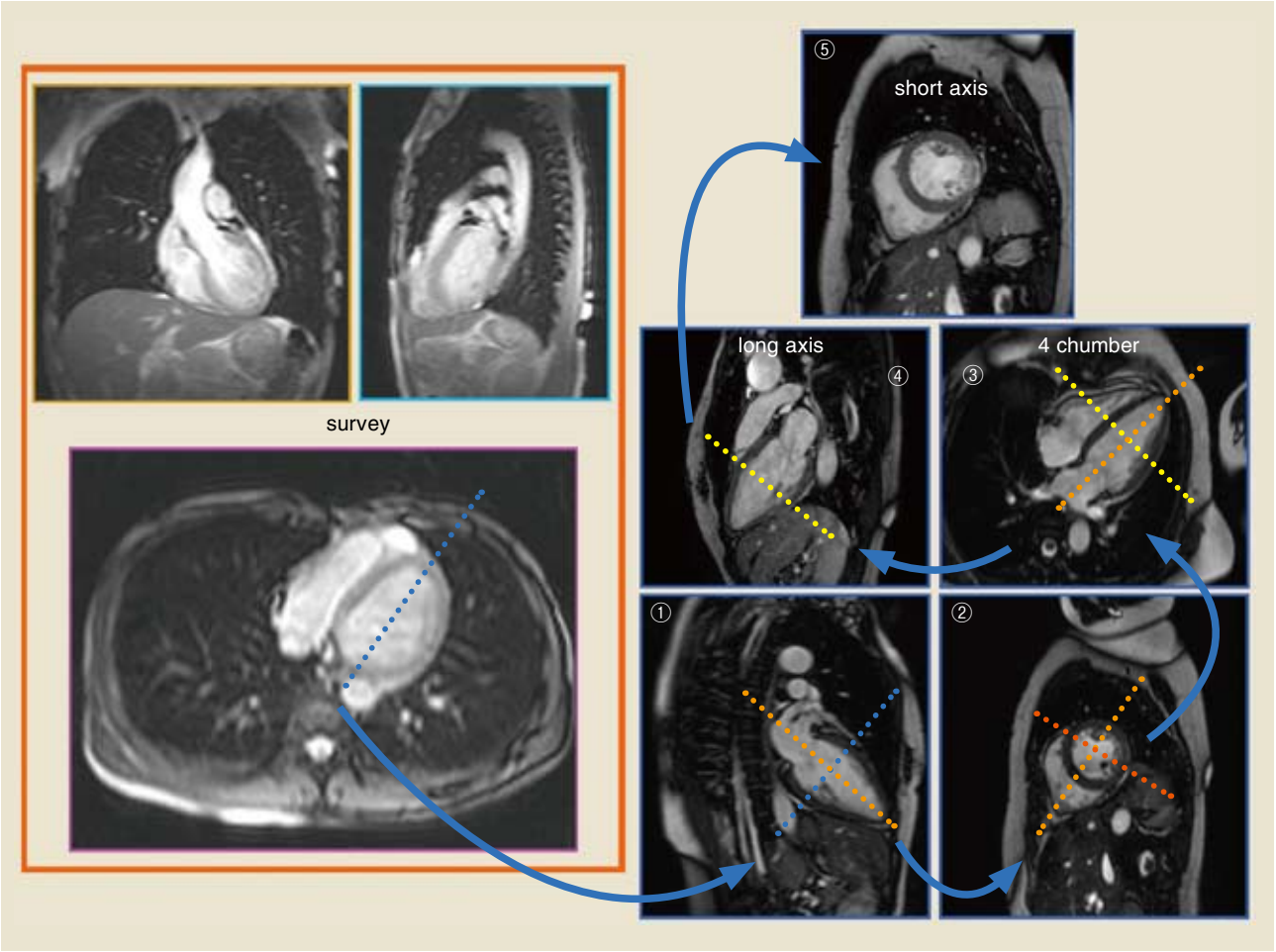

図 2　撮像断面の設定手順

ことで，より短時間の検査が可能となる．さらに，必要最小限の撮像内容であれば，T2WI-STIR-black blood，cine MRI，perfusionを省いてLGEのみのプロトコールがあり，検査室外で造影剤を注入し，約10分後，LGEを撮像する手順となっている．これにより，準備を含め30分以内の検査時間が可能となり，CMRのデメリットを克服することが可能である．

そのほか，動きによるアーチファクトが挙げられる．CMRにおける動きは，呼吸と心拍動であるが，これはすでに対策技術は確立しており，心電同期や呼吸同期により解消されている．

同期の方法は各メーカーさまざまであるが，呼吸同期においてはnavigator echo法を採用することで，安定した呼吸停止様の画像を得ることが可能である．このnavigator echo法は，肝臓の最上面と肺野の境目に配置することから，図 5 のような画像を見ることができる．この呼吸同期法は，あらゆるモダリティーのなかで唯一MRIが有している技術で，他のMRI撮像(胸部や腹部)においても使用されている技術である．

図 5 においてnavigator echo法の概略を説明すると，肺野は空気が多いため，無信号であり，そのためnavigator echo法の信号も弱く，肺野では黒くなる．一方，肝臓は充実性なので，navigator echo法の信号は強く，肝臓では白くなる．呼吸の動きに沿って波打っている赤色ポイントは，RF pulseにより励起された画像データである．青い線間はgating windowで，線間に入ってきた赤色ポイントだけ画像データとして収集(緑ポイント：accept data)し，繰り返し行うことで，安定した呼吸同期画像を得ることが可能である．このgating windowは可変できるので，固有の呼吸量に合わせた設定ができる．

心電同期は心臓の拍動に合わせた撮像を可能とするvector心電図(VCG)を使用している．このVCGは，拍動している心臓をretrospective，prospective，triggerと，撮像方法，用途に合わせて設定が可能である．また，MRIはコントラスト・時間・空間分解能のtrade offに関与するが，他のモダリティーと比較にならないほど短時間のdata sampling(数msec単位)が可能であり，この特性により，呼気時で，かつ心臓が止まっている数十～数百msecの間だけデータ収集を行い，良好なWHC-MRAなどの静止画像を得ることができる．

次に，強力な磁石を使用しているMRIにとって金属

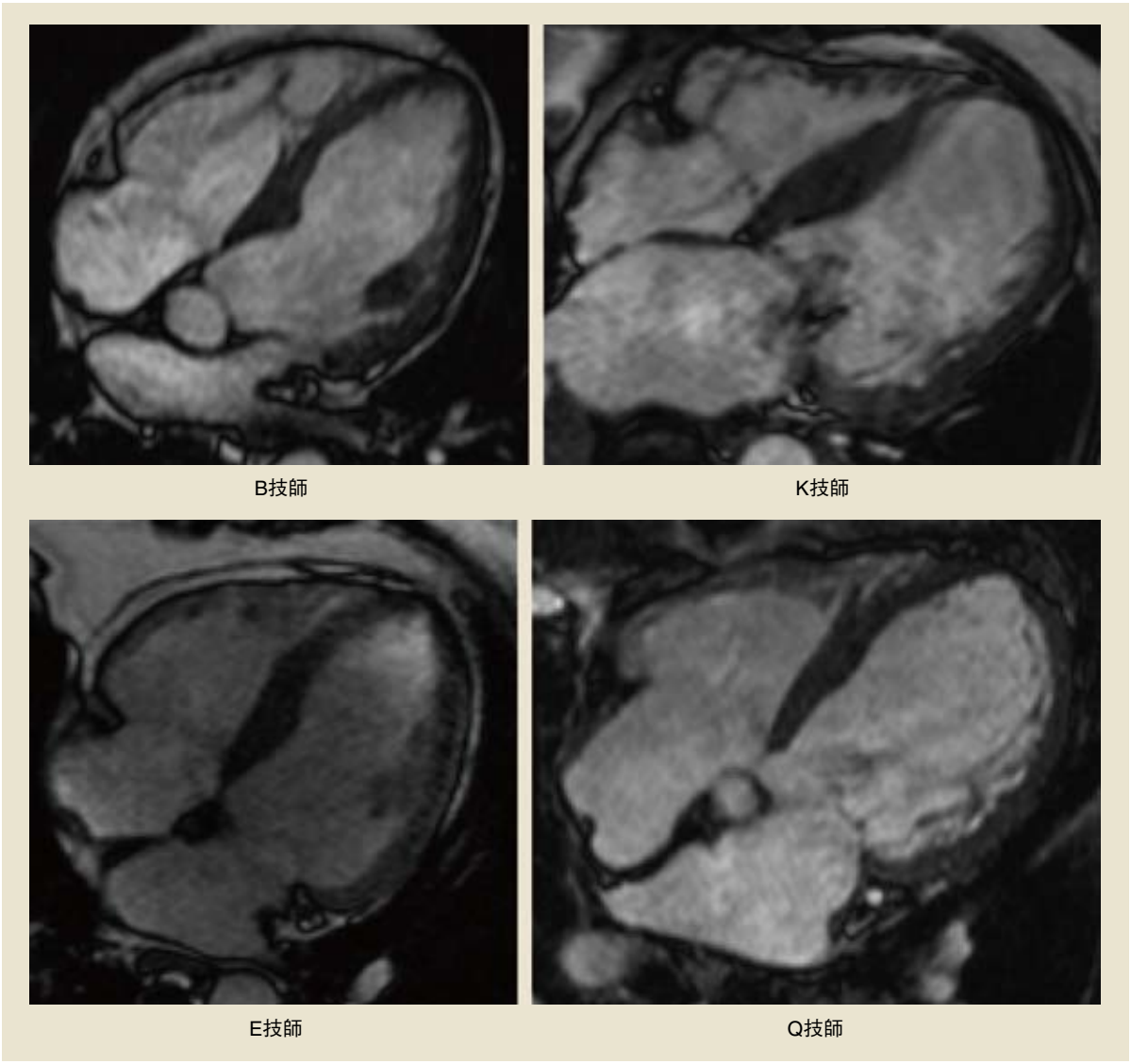

図３　撮像断面の自由度と再現性

は，画質の劣化や吸引・吸着だけでなく，発熱などの身体的影響など，さまざまな理由から，注意もしくは懸念されている事柄である．とくにステント留置後の症例に対してのCMR撮像に対し，数年前まで疑問の声が上がっていた．最近のステントにおける取扱説明書には，3 テスラ以下のMRIにおいて，ステントの位置ズレを起こさないことや，また，若干発熱はあるが，それは規定値以内であることが記載されている．つまり，ステント留置後においても若干の画質低下は起こす可能性があるが，身体的に影響や不具合を起こすことはないということとなっている．ただし，一定の撮像条件下においての記載なので，ステントごと確認は必要と思われる．

CMRの評価

心筋の評価を行う検査法としてSPECTがあり，長く心臓領域で行われてきた検査法のため，エビデンスも充実している．CMRにおいても多くの論文・報告があり，その多くがSPECTと比較検討され，CMRの有用性が認められてきている．

CMRのperfusion imagingは，心筋血流評価が可能である．PCI後のAMIに対し，rest-perfusionを施行することで，これにおける血流低下は心機能の予後を示唆するといわれている[1]．また，冠動脈の有意狭窄を有する患者に対してstress-perfusionによる血流低下の描出は，sensitivity=MRI: 94％ , SPECT: 82％で，stress-perfusionはSPECTより優れていることがわかる[2]．

次に，LGEとSPECTにおいて，心筋梗塞の壁進達度を評価する場合，心筋梗塞が76～100％のとき，MRI，SPECT，ともに同等に評価することが可能であるが，25％以下の壁進達度診断はMRIの方が有用である[3]．また，sensitivity，specificityともに，MRIがSPECTよりも有用であるという報告もされている[4]．このLGEは壊

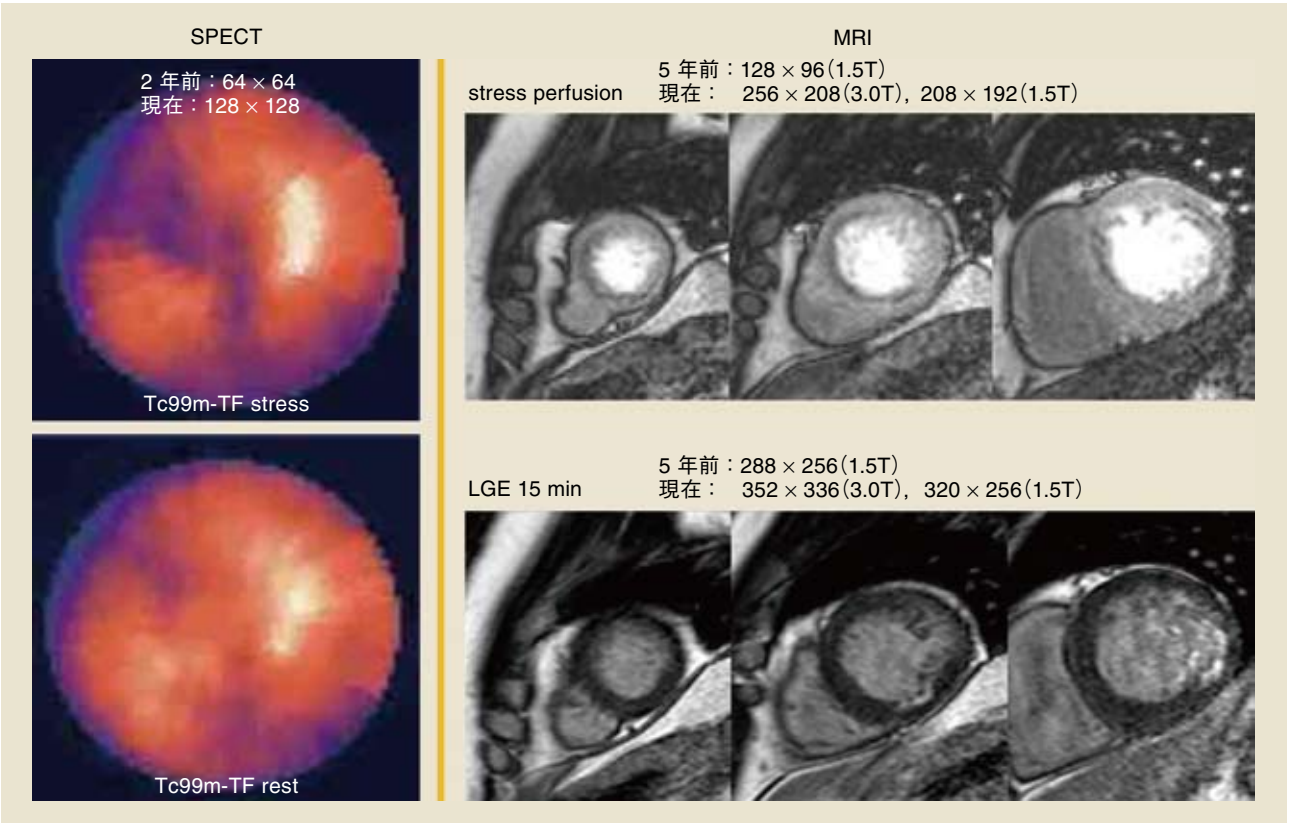

図 4　空間分解能の移り変わり

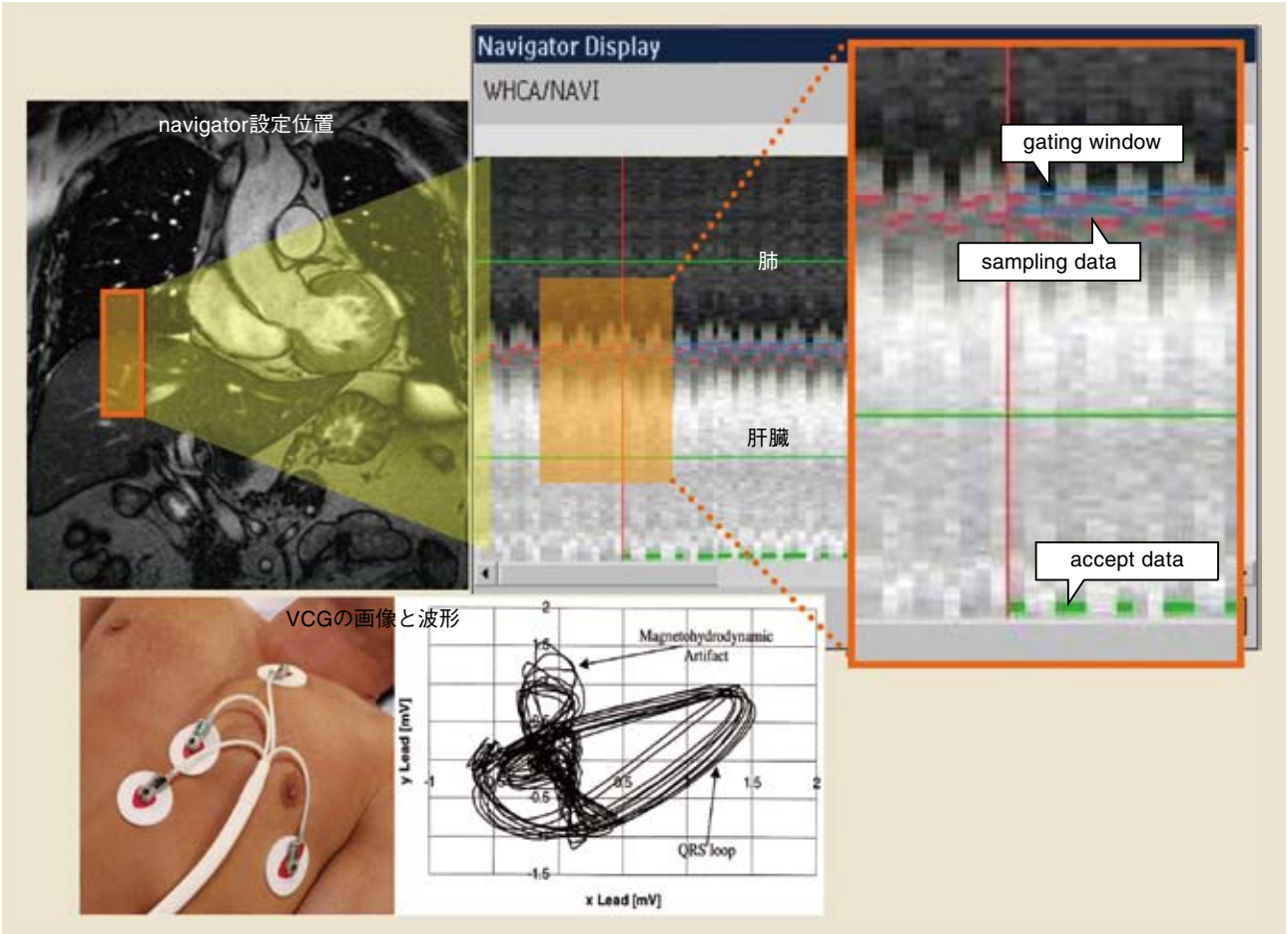

図 5　navigator echo法とVCGの設定

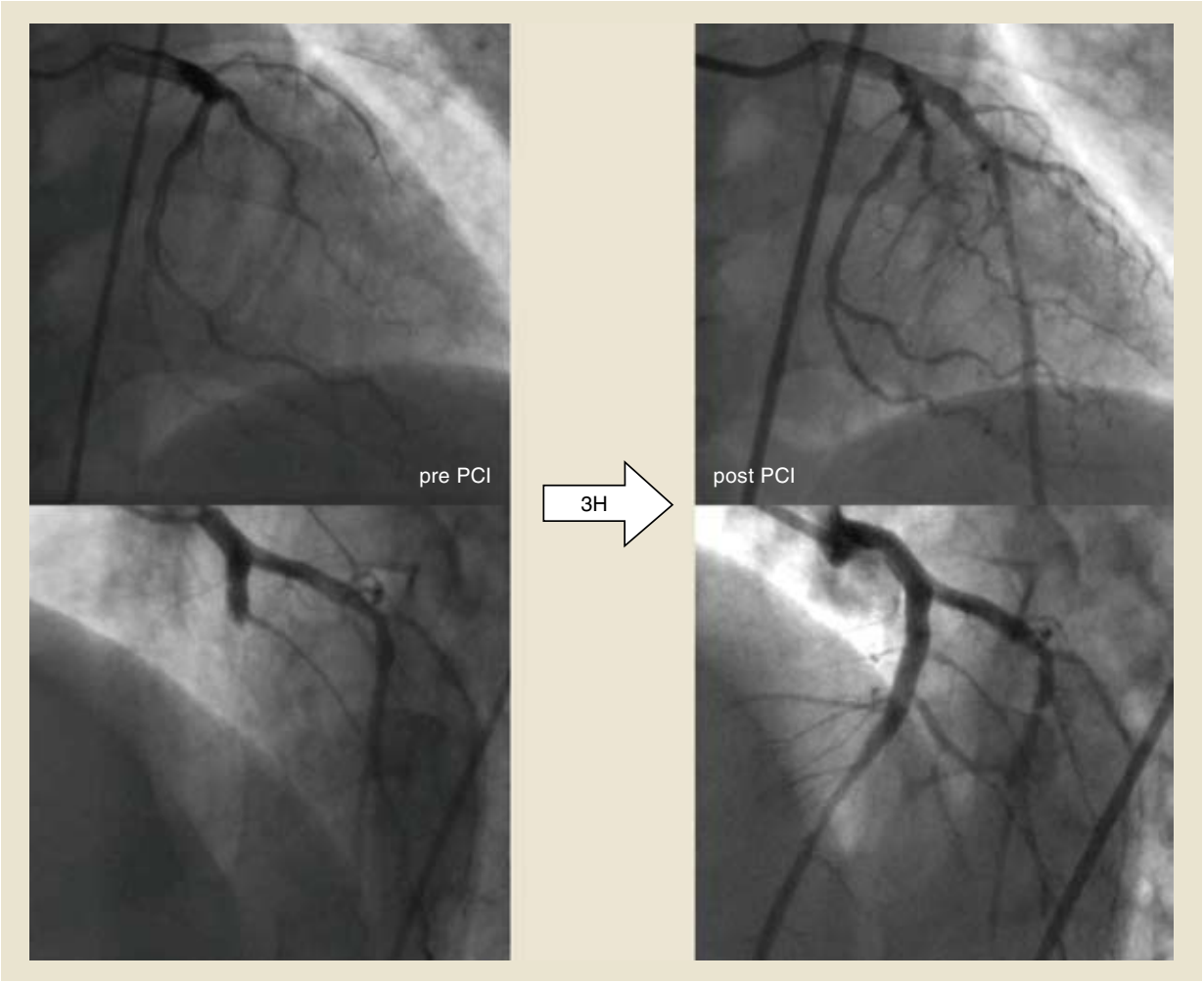

図６　LAD #6 100%のAMI症例

死心筋がどのくらい進達しているのかが重要であり，心機能に深く関与してくる．心筋梗塞が壁進達度50%以上の場合は，血行再建治療をしても，局所壁運動の改善は見込めないが，25%以下のものに関しては，局所壁運動の改善が期待できるという報告がある[5]．つまり，LGEにより，後の内科的治療，PCI(percutaneous coronary intervention)を含めて治療方針の決定基準となる可能性がある．

しかしながら，LGEにおいて問題点があり，検査時間短縮のため，呼吸停止下で撮像することが多く，空間分解能もしくはコントラストを低下させなければならない．現状ではコントラストの減少による時間短縮は不可能であり，分解能を犠牲にして短時間撮像を可能としている．大抵，LGEにおいて，ピクセルの大きさ(もしくはmatrix)を可変せず，スライス厚を厚くして撮像している．これにより，LGEのpartial volume effectが大きくなり，正確な進達度診断に支障をきたしてしまう．逆に，slice厚をより薄くすることで，精細に心筋梗塞の進達度診断を行うことが可能となってくる[6]．通常使用しているWHC-MRAのシーケンスにinversion recovery法を付け加えることで，thin sliceのLGEが撮像できる．inversion timeは正常心筋のnull(正常心筋の信号強度≒0)となる時間を設定するだけで，心筋梗塞の部分を明瞭に，かつ正確に診断することが可能となった．これの撮像法はWHC-MRAのシーケンスと同位置に撮像できるため，後処理によりfusion画像も得られ，心筋梗塞の部分だけを描出するだけでなく，責任血管と心筋梗塞の関係を明瞭に把握することができる．この撮像を可能にした理由としては，他のモダリティーにはない，MRIの特色が関与しており，撮像するにあたり，設定する項目が7,750,000通り(当院MRIの場合)の組み合わせがあり，これを駆使して，このようなwhole heart LGEの撮像が可能となった．

症例提示

図６の症例は，50歳代，男性．CAGにおいてLAD #6の，狭窄率が100%と診断された症例である．血行再建後LAD #6は狭窄率 0%となり，冠血流も改善され

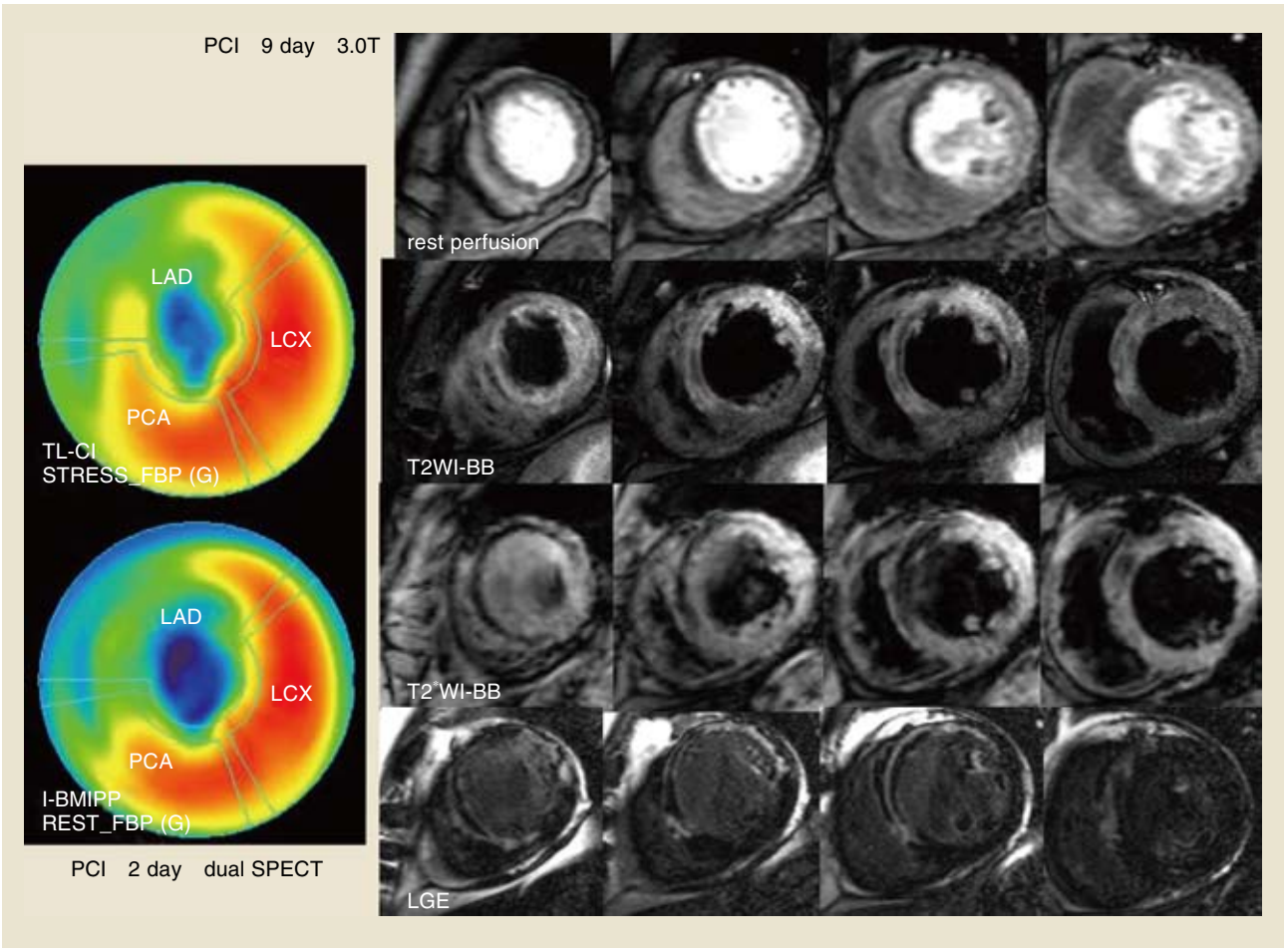

図 7　LAD #6 100% PCI後のSPECTとCMR

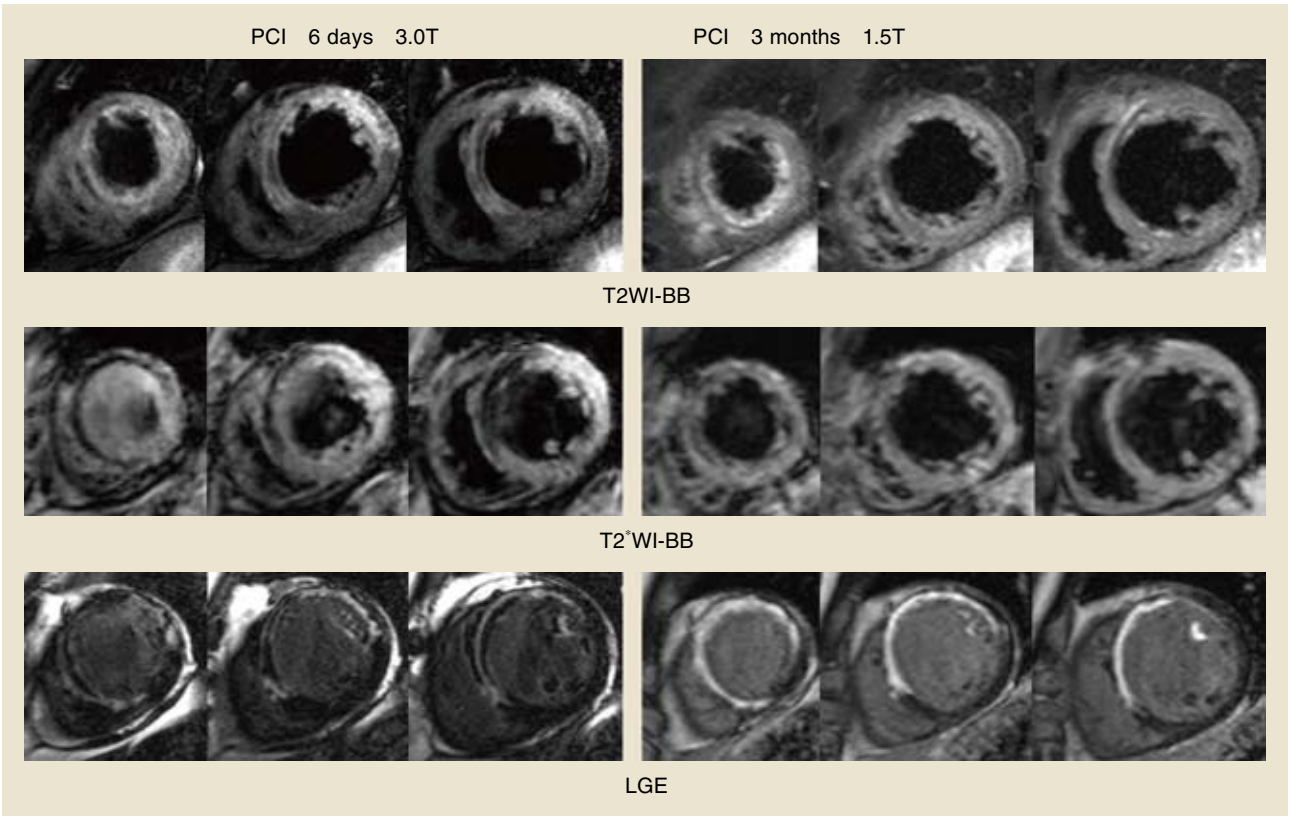

図 8　LAD #6 100%のAMI症例における1.5Tと3.0TのCMR

図９　LAD # 7 100%，LCX #13 90%のAMI症例

た．血行再建２日後にI-BMIPPとTl-CLにおけるdual心筋SPECTの画像において，LADの領域にRIの取り込み欠損がみられ，この領域に対して生存心筋（viability）はほとんどないという診断となった（図７）．CMRでrest-perfusionにおいても，同領域に血流低下が見受けられる．T2WI-STIR-black bloodにおいても，中等度～高信号の領域が見受けられ，その領域の中心部分には無信号領域が見受けられる．T2*-WI-black bloodでは，T2WI-STIR-black bloodの無信号領域とほぼ一致している．LGEにおいてリング状の造影効果がある場合，この画像所見はMOと，一般に表現される．病期にもよるが，T2*WIは組織の出血の同定に非常に有用であることから，MOは心筋内出血と考えられる．急性期LGEにおける梗塞心筋の壁進達度から，本症例は心機能の改善が見込めないと予測され，慢性期ではMOは消失し，cine MRIにおいて壁運動改善が認められていない（図８）．

図９は，60歳代，男性．CAG上LAD #7に100%，LCX #13に90%の狭窄を認める症例である．血行再建は両冠動脈に対し行われ，良好な冠血流が得られている．dual心筋SPECTのI-BMIPPでは，心尖部に集積低下を認めるが，Tl-CLでは認められない．にもかかわらず，CMRにおけるLGEでは心尖部に梗塞巣が認められ，SPECTと比較しより高分解能であることがうかがえる（図10）．

図11は，LAD #7に中等度狭窄を認める症例である．WHC-MRAにおいても，同様に狭窄を評価することが可能である．しかし，CAGと比較し，WHC-MRAのvolume renderingでは過大評価されている．これは主観的にthresholdを決定してしまうためで，狭窄度判定には不向きである．正確な診断にはmaximum intensity projection（MIP）が有用であり，多くのワークステーションでslab厚が可変できるため，real timeに角度を調整できるsliding MIP法が汎用されている．

図12では，WHC-MRAのMIP像でLAD #6の器質的狭窄が描出されている．T1WI-SPIR-black bloodを短軸で撮像すると，狭窄部位は中程度の信号を有している．血管内超音波では同部位にプラークを認め，プラーク診断にもMRIが有用と考えられるが，プラーク診断においては検査の成功率や撮像時間・診断精度などの問題を抱えており，今後改善していく必要があると思われる．

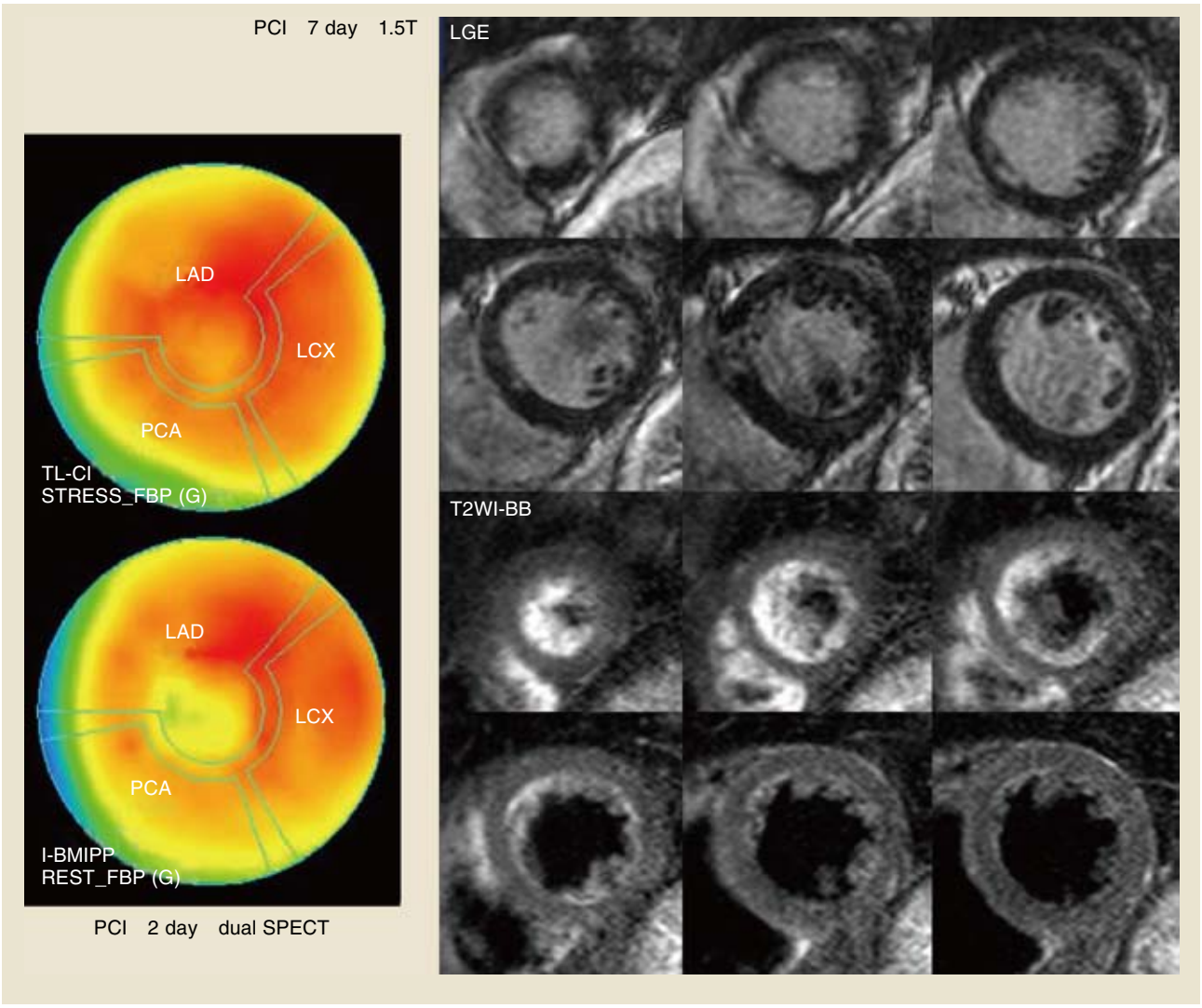

図10　LAD #7 100%，LCX #13 90% PCI後のSPECTとCMR

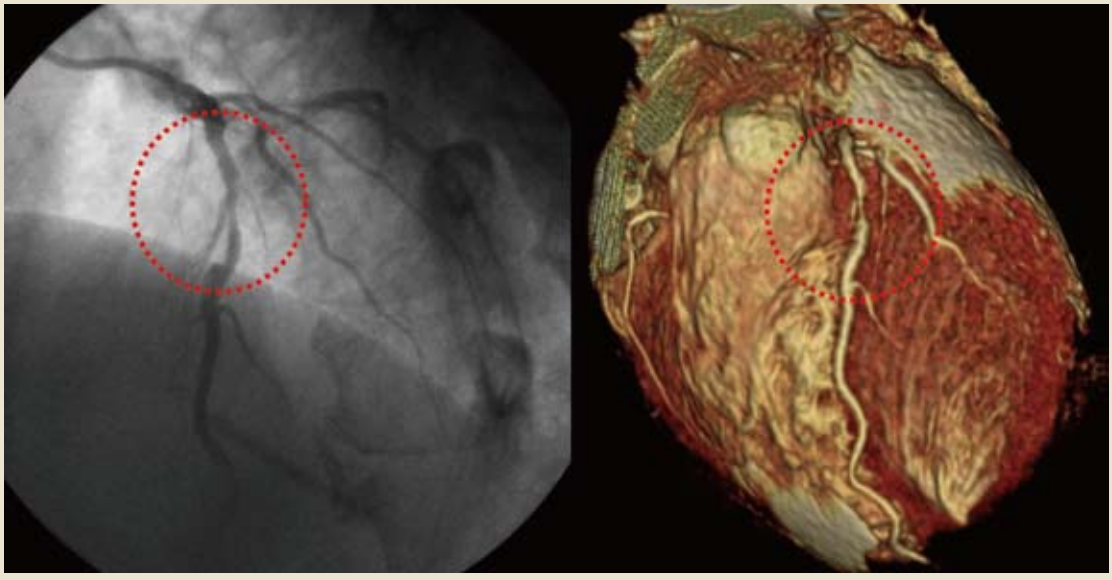

図11　CAGとWHC-MRA volume rendering

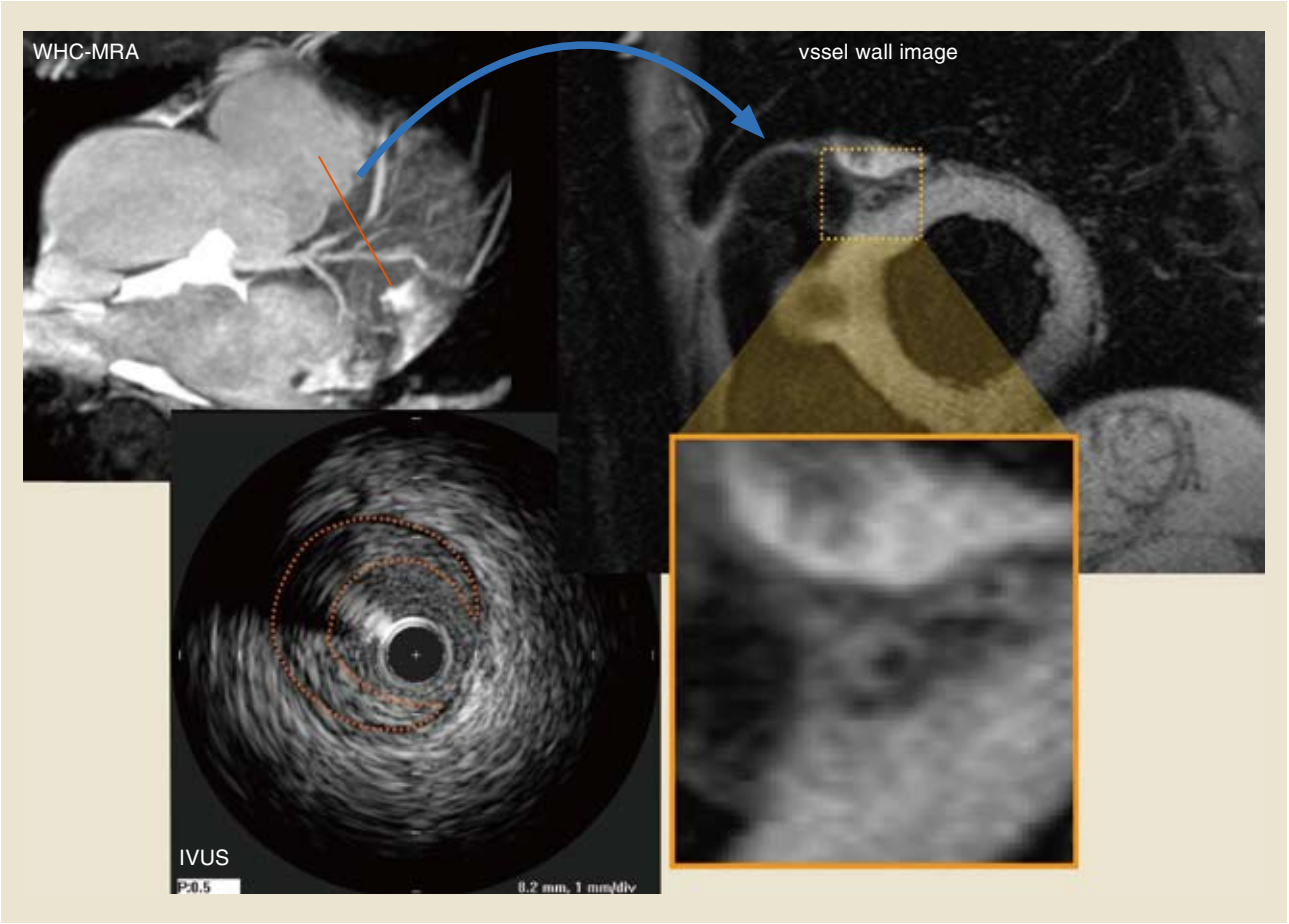

図12　vessel wall imageとIVUSの比較

最 後 に

心臓の診断については胸部のX線をはじめ，心電図，血液検査，冠動脈造影検査や超音波検査，核医学検査，CTなどあるが，one stop shopという観点からいえば，MRIは一番近い検査と思うが，これを行うには患者の精神的ストレスがかなり大きくなってくる．今後は心筋梗塞の人に対しての撮像方法，メタボリックシンドローム予備軍に対して心臓検診の目的で行う非造影での検査方法，さまざまなプロトコールによってCMRが容易に，かつ正確に検査されていくと思われる．

本稿がMRIに携わる術者にとって，CMRの技術を習得するきっかけとなっていただけると光栄である．そして，今後のCMRの発展につながることを期待して締めくくりたいと思う．

参考文献

1）Rogers WJ Jr, Kramer CM, Geskin G, et al.: Early contrast-enhanced MRI predicts late functional recovery after reperfused myocardial infarction. Circulation 99: 744-750, 1999.
2）Ishida N, Sakuma H, Motoyasu M, et al.: Noninfarct myocardium: correlation between dynamic first-pass contrast-enhanced myocarial MR imaging and quantitative coronary angiography. Radiology 229 (1): 209-216, 2003.
3）Wagner A, Mahrhold H, Holly TA, et al.: Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detection of subendocardial myocardial infarcts: an imaging study. Lancet 361: 374-379, 2003.
4）Kitagawa K, Sakuma H, Hirano T, et al.: Acute myocardial infarction: myocardial viability assessment in patients early thereafter-comparison of contrast enhanced MR imaging with resting (201) Tl SPECT. Single photon emission computed tomography. Radiology 226: 138-144, 2003.
5）Kim RJ, Wu E, Rafael A, et al.: The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. N Engl J Med 343 (20): 1445-1453, 2000.
6）Kim RJ, Fleno DS, Parrish TB, et al.: Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function. Circulation 100: 1992-2002, 1999.